

Aalborg Universitet



Beton

Frost og Resonans

Jensen, Jens Kristian Jehrbo

Publication date:
1986

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Jensen, J. K. J. (1986). *Beton: Frost og Resonans*. Institut for Bygningsteknik, Aalborg Universitet. Aalborg Universitetscenter. Instituttet for Bygningsteknik. Report Nr. R8605

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

INSTITUTTET FOR BYGNINGSTEKNIK
INSTITUTE OF BUILDING TECHNOLOGY AND STRUCTURAL ENGINEERING
AALBORG UNIVERSITETSCENTER · AUC · AALBORG · DANMARK

BETON
FROST OG RESONANS

JENS KR. JEHRBO JENSEN
BETON: FROST OG RESONANS
MARTS 1986

ISSN 0105-7421 R8605

INSTITUTTET FOR BYGNINGSTEKNIK

INSTITUTE OF BUILDING TECHNOLOGY AND STRUCTURAL ENGINEERING

AALBORG UNIVERSITETSCENTER · AUC · AALBORG · DANMARK

BETON

FROST OG RESONANS

JENS KR. JEHRBO JENSEN
BETON: FROST OG RESONANS
MARTS 1986

ISSN 0105-7421 R8605

INDHOLD

	side
FORORD	1
INDLEDNING	2
FORSØGSSTRUKTUR	3
MALINGER	3
Ultralydhastighed	3
Resonansfrekvens	4
Trykprøvning	4
BEREGNINGER	4
RESULTATER	6
Betonblandinger	6
Lagring	6
Fysiske egenskaber	11
Rumvægt	11
Lydhastighed	11
Trykstyrke	11
Elasticitetsmodul	11
Poissons forhold	11
Bjælker	11
Statistisk behandling	16
Grafisk behandling	17
KONKLUSION	27
LITTERATUR	28

FORORD

I denne rapport er resultaterne af et indledende forsøg med resonansfrekvensbestemmelse af beton behandlet. Forsøget bygger på den antagelse, at ændringer i et materiales resonansfrekvens kan afspejle emnets holdbarhedsmæssige egenskaber.

Under udarbejdelsen af rapporten har forfatteren anvendt nogle af de opnåede resultater til at indøve teknikken med EDB-grafik. I rapporten er der vist eksempler herpå.

Laborant Arne Thomsen har på sin sædvanlige sobre måde været en stor hjælp ved udførelsen af forsøgene. En række af AUD's lærere har velvilligt givet mig et første indblik i EDB-verdenen, idet jeg deltog i kurserne: Pascal 1 og 2. Søren Kloch, Louis Evensen og flere studerende har hjulpet mig, når det »brændte på» ved tastaturet. Dorte Bundgaard har udført tegningerne, og Tove Jensen har renskrevet rapporten.

Uden disse mange bidrag var der ikke kommet noget rapport, og alle bedes modtage min hjerteligste tak.

Jens Kr. Jehrbo Jensen

INDLEDNING

Målinger af resonansfrekvenser på beton kan anvendes til ikke-destruktiv bestemmelse af materialets stivheds- og dæmpningsegenskaber. Hvis betonen udsættes for frost, tøsalt eller brand kan den blive nedbrudt, og dette viser sig ved, at den dynamiske stivhed formindskes, d.v.s. et fald i resonansfrekvens kan registreres. Som et indledende forsøg er der af nogle betonblandinger fremstillet prøvelegemer (bjælker, cylindre), som dernæst har været udsat for forskellige klimatiske påvirkninger (vandlagring og klimalagring i kombination). Styrkeudviklingen er fulgt over en 3 måneders periode, og resonansfrekvensen samt andre egenskaber er målt.

I rapporten er der foretaget grafiske afbildninger og statistiske beregninger på relevante resultater, og der er anvendt EDB-grafik (PLOT3D) [5].

FORSØGSSTRUKTUR

I det følgende beskrives den overordnede struktur for forsøget. Der udstøbes i alt 10 betonblandinger, idet 5 forskellige blandinger hver udstøbes 2 gange i tilfældig rækkefølge. Hver blanding udstøbes i 20 stk. 100/200 mm cylindre samt 2 uarmerede bjælker med dimensionerne 50 x 50 x 200 mm og 100 x 100 x 400 mm. Det totale antal cylindre bliver på denne måde = 200 stk. samt 10 små og 10 store bjælker.

De 5 blandinger A, B, C, D, E er karakteriseret ved hvert sit c/v-forhold, således

Blanding	c/v-forhold
A	0,6
B	1,0
C	1,5
D	2,0
E	2,5

Hver blanding tildeles et nummer, 1 eller 2, alt efter lagringsmetoden.

Efter metode 1 lagres prøvelegemerne normalt, dvs. ved 20 C i vand. Efter 28 døgn placeres 10 cylindre + 2 bjælker i et klimaskab. Efter metode 2 lagres 10 cylindre i vand ved 20 C, mens 10 cylindre + 2 bjælker placeres i klimaskab efter afformningen, dvs. efter ca. 1 døgn. I det følgende benyttes betegnelserne vandlagring og klimalagring for de to lagringsformer.

Laboratoriets klimaskab er omtalt i [3], og ved dette projekt er skabet programmeret til at køre efter følgende døgncyklus:

1. Afkøling fra 10 C til 0 C i løbet af 2 timer
2. Afkøling fra 0 C til -15 C i løbet af 5 timer
3. Konstant lagring ved -15 C i 8 timer
4. Opvarmning fra -15 C til 0 C i løbet af 3 timer
5. Opvarmning fra 0 C til 10 C i løbet af 4 timer
6. Konstant lagring ved 10 C i 2 timer.

Den relative luftfugtighed er »stillet» så højt som muligt, dvs. > 95%.

Prøvningsterminen er valgt til 1, 2, 7, 28, 56 og 91 døgn, og ved hver termin måles ultralydshastighed og resonansfrekvens på 2 cylindre og 2 bjælker. Cylindrene trykprøves og bjælkerne anvendes igen. Af tabel 1 fremgår, hvad prøvningen omfatter, idet emnerne også måles og vejes.

MÅLINGER

Ultralydshastighed

På de enkelte emner måles gennemløbstiden, T_1 μ s for en lydbølge med en frekvens på 200 kHz. Hvis den målte længde er L mm, er ultralydshastigheden givet ved

$$V = \frac{L}{T} \text{ km/s}$$

Der måles 3 steder for at få et skøn over spredningen. Til denne måling anvendes laboratoriets »PUNDIT» udstyr, som er beskrevet i [1].

Prøvning \ Termin		1 døgn	2 døgn	7 døgn	28 døgn	56 døgn	91 døgn
VANDLAGRING	Cylindre						
	- ultralydhastighed	x o	x o	x o	x o	x o	o
	- resonansfrekvens (l)	x o	x o	x o	x o	x o	o
	- trykprøvning	x o	x o	x o	x o	x	o
	Bjælker						
	- ultralydhastighed		x	x	x		
KLIMALAGRING	- resonansfrekvens (b)			x	x		
	Cylindre						
	- ultralydhastighed		o	o	o	x o	x o
	- resonansfrekvens (l)		o	o	o	x o	x o
	- trykprøvning		o	o	o	x o	x o
	Bjælker						
	- ultralydhastighed		o	o	o	x o	x o
	- resonansfrekvens (b)		o	o	o	x o	x o

Tabel 1. Lagrings- og prøvningsomfang for cylindre og bjælker.

x: Prøvning efter lagringsmetode 1.

o: Prøvning efter lagringsmetode 2.

l: Længderesonans.

b: Bøjningsresonans.

Resonansfrekvens

Emnernes resonansfrekvens ved længde- eller bøjningssvingninger bestemmes i overensstemmelse med metoden angivet i [2].

På cylindrene bestemmes længderesonansfrekvensen, idet cylinderen ophænges i en lang ståltråd på midten, således at man ved resonans opnår, at knudepunktet ligger på dette sted.

Bjælkerne udsættes for bøjningssvingninger, idet bjælkerne ophænges i 2 lange ståltråde placeret 0,22 x længden fra hver ende svarende til knudepunkternes beliggenhed.

Trykprøvning

2 cylindre trykprøves efter hver termin efter DS 423, idet der er valgt en belastningshastighed på 5 kN/s. Prøvningen sker på laboratoriets trykprøvemaskine, TONIPACT 3000.

BEREGNINGER

Resonansfrekvenser kan anvendes til at beregne en værdi for det dynamiske elasticitetsmodul E_{dl} eller E_{db} i $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$.

Ved længdesvingninger er

$$E_{dl} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot L^2 \cdot \rho \cdot f_e^2 \cdot \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot \nu^2 \cdot I}{A \cdot L^2}\right)$$

for grundsvingningen.

Her er L = prøvens længde, m
 ρ = prøvens densitet kgm^{-3}
 f_e = resonansfrekvens, s^{-1}
 ν = dynamisk Poisson forhold
 I = inertimoment, m^4
 A = prøvens areal, m^2

Det betyder, at

$$E_{dl} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot \rho \cdot f_e^2 \cdot \left(L^2 + \frac{\pi^2 \cdot \nu^2 \cdot I}{A}\right)$$

Indsætter man værdierne for en 10/20 cm cylinder : $L = 0,2 \text{ m}$, $I = \frac{\pi}{64} \cdot 0,1^4 \cdot \text{m}^4$ og $A = \frac{\pi}{4} \cdot 0,1^2 \text{ m}^2$ fås

$$E_{dl} = \rho \cdot f_e^2 \cdot (0,16 + 0,0247 \nu^2) \cdot 10^{-6} \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2} \quad (1)$$

For bøjningsgrundsvingningen gælder, at

$$E_{db} = \frac{0,79 \cdot 10^{-6} \cdot M \cdot L^3 \cdot f_b^2 \cdot T}{\pi^2 \cdot I} \cdot \frac{1 + \frac{i}{L} \cdot (0,26 \cdot \nu + 3,22 \cdot \nu^2)}{1 + 0,133 \cdot \frac{i}{L}}$$

Her er M = prøvens masse i kg
 i = tværsnittets inertiradius, m
 T = korrektionsfaktor = 1,40, se [2].

For en prismatisk bjælke med højden = bredden = a m og længden = L m gælder, at

$$M = a^2 \cdot L \cdot \rho, I = \frac{a^4}{12} \text{ og } i = \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot a$$

Indsætter man de aktuelle værdier for henholdsvis den store bjælke og den lille bjælke fås

$$E_{db}^B = 3,414 \cdot 10^{-6} \cdot \rho \cdot f_b^2 \cdot (1 + 0,0188 \cdot \nu + 0,2324 \cdot \nu^2) \quad (2)$$

og

$$E_{db}^b = 0,853 \cdot 10^{-6} \cdot \rho \cdot f_b^2 \cdot (1 + 0,0188 \cdot \nu + 0,2324 \cdot \nu^2) \quad (3)$$

Ultralydhastigheden kan også anvendes til at beregne emnets dynamiske elasticitetsmodul, E_{dl} , idet

$$E_{dl} = \rho \cdot V^2 \cdot \frac{(1 + \nu)(1 - 2 \cdot \nu)}{1 - \nu} \cdot 10^{-6} \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$$

for længdesvingninger. Antages det, at man kan sætte værdien for elasticitetsmodulet målt ved resonans = værdien målt ved ultralyd, får man

$$\left(\frac{f_e}{V}\right)^2 = \frac{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)}{(1-\nu) \cdot (0,16 + 0,0247 \cdot \nu^2)} \quad (4)$$

Anvender man samme ræsonnement for bøjningssvingninger, får man i de to tilfælde

$$\left(\frac{f_b}{V}\right)_B^2 = \frac{0,293 \cdot (1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)}{(1-\nu) \cdot (1 + 0,0188 \cdot \nu + 0,2324 \cdot \nu^2)} \quad (5)$$

og

$$\left(\frac{f_b}{V}\right)_b^2 = \frac{1,173 \cdot (1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)}{(1-\nu) \cdot (1 + 0,0188 \cdot \nu + 0,2324 \cdot \nu^2)} \quad (6)$$

Ligning 4 er afbildet på figur 1 og ligning 5 og 6 på figur 2. Ud fra målinger af f og V kan der skønnes en værdi for ν , og de respektive E-moduler kan beregnes ud fra (1), (2) eller (3).

RESULTATER

Betonblandinger

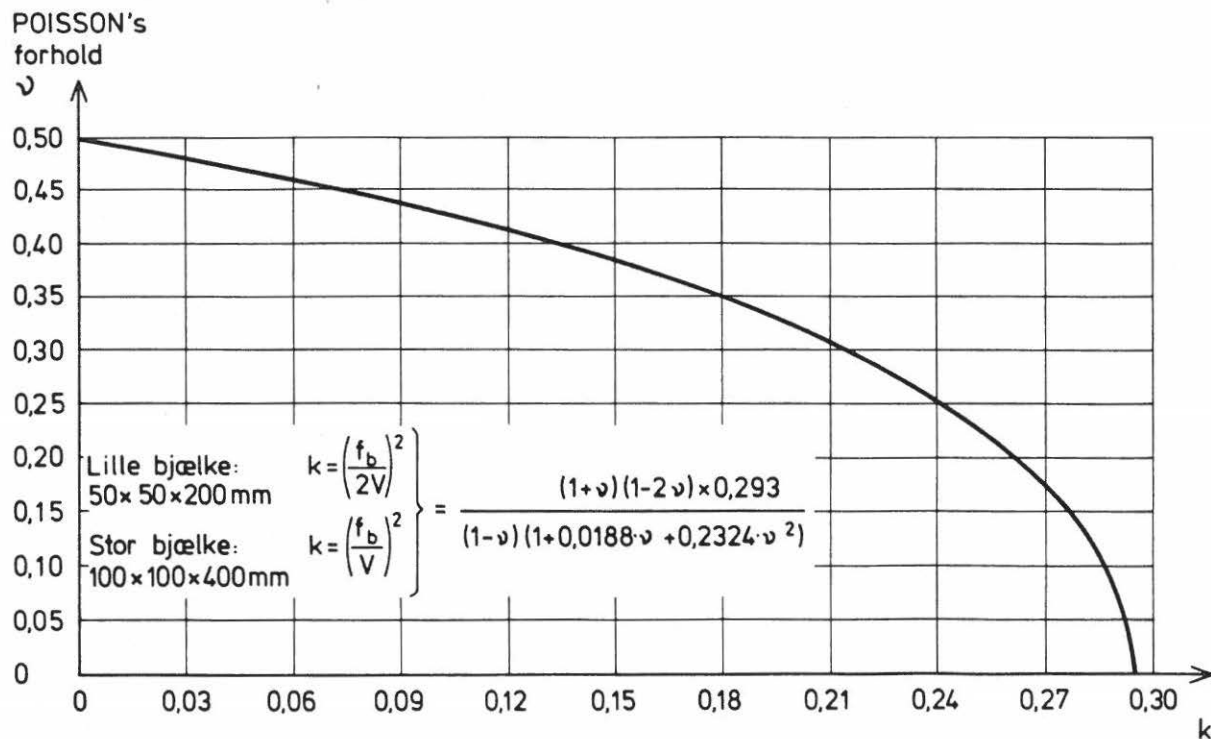
Tabel 2 viser sammensætningen i $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ beton for de 10 blandinger samt relevante oplysninger om målt luftindhold, beregnet og målt rumvægt samt forventet 28-døgns styrke efter Bologneys udvidede formel. Det ses, at der er rimelig god overensstemmelse mellem målte og beregnede rumvægte. A1-blandingen var dog noget tør og svær at komprimere.

Lagring

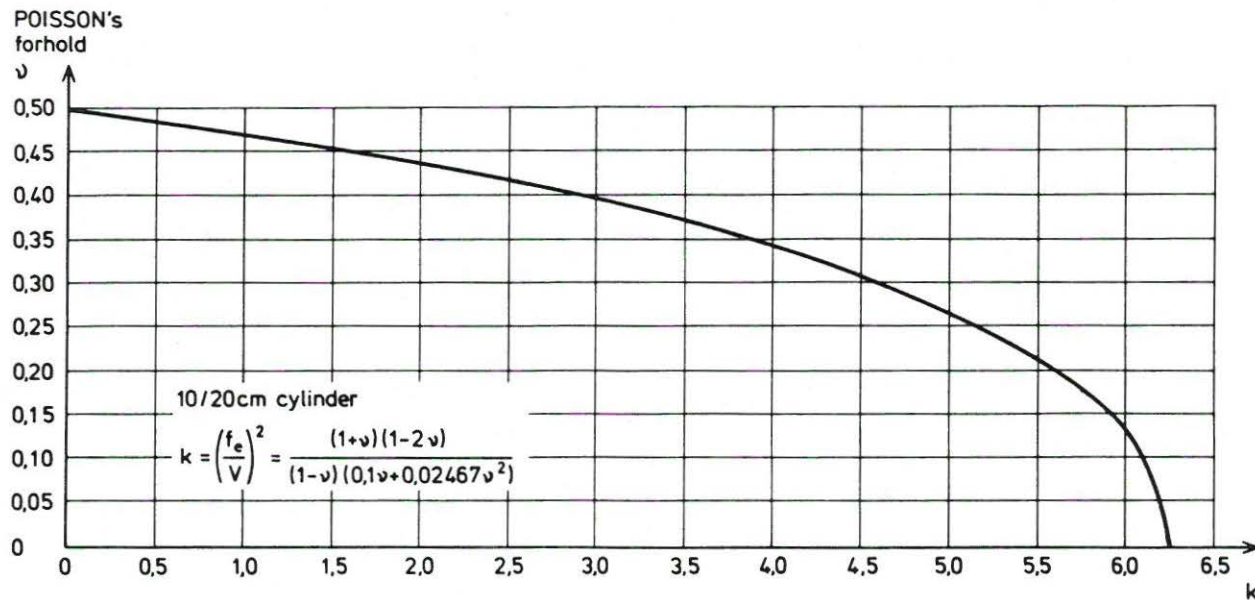
Da betonemnerne ikke alle lagres ved samme temperaturer i hele perioden, er det nødvendigt at beregne betonens *modenhed* til de forskellige prøvningsterminer. Modenheden er i princippet en produktsum af temperatur og tid, og som enhed for modenheden anvendes her 1 døgn ved 20 C, således at betonen ved vandlagring ved 20 C i x døgn har opnået en modenhed på x døgn ved 20 C.

Ved klimalagringen varierer temperaturen efter en døgncyklus, som angivet under »forsøgsstruktur». På klimaskabet er monteret en skriver, som tidsregistrerer temperaturen, og overensstemmelsen mellem det forventede og det målte er overordentlig god. I et enkelt tilfælde er temperaturen i en betoncylinders indre fulgt over ca. 1 måned. Betontemperaturen og skabs-temperaturen kan på nær en beskedne tidsforskydning sættes lige store.

Ved beregning af modenheden ved klimalagringen er det nødvendigt at kende middeltemperaturer, tidsrum samt hastighedsfaktorer i forhold til hastigheden ved 20 C. I tabel 3 er det beregnet, at 1 døgns klimalagring svarer til 0,117 døgns lagring ved 20 C. Ud fra de tilstræbte lagringsmetoder kan modenheden beregnes til hvert tidspunkt, men p.g.a. uheld er nogle prøvninger foretaget ved andre terminer og efter andre lagringsbetingelser end påregnet. Tabel 4 viser modenheden ved de reelle prøvningsterminer, idet dog enkelte døgns afvigelse reguleres med 1 døgn ved 20 C pr. døgns afvigelse ved vandlagringen og 0,117 døgn ved 20 C pr. døgns afvigelse ved klimalagringen.



Figur 1. Bestemmelse af Poissons forhold ud fra længdesvingninger.



Figur 2. Bestemmelse af Poissons forhold ud fra bøjningssvingninger.

Blanding Komponenter m.m.		A		B		C		D		E	
		A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2
Cement, PC/A/L/S	kg/m ³	106	99	155	149	256	240	324	329	408	406
Vand	kg/m ³	169	157	155	149	172	161	162	165	163	162
Bakkesand, 0-4 mm	kg/m ³	1007	976	981	965	970	945	909	922	890	885
Søsten, 4-8 mm	kg/m ³	1007	976	981	965	970	945	909	922	890	885
Luftindhold	%	2,2	6,0	4,0	6,0	1,7	3,5	3,5	2,0	2,2	2,7
Rumvægt, beregnet	kg/m ³	2289	2208	2272	2228	2368	2291	2304	2338	2351	2338
Rumvægt, målt	kg/m ³	2233	2208	2277	2222	2346	2305	2335	2369	2379	2369
28-døgns styrke	MN/m ²	7,4	5,0	13,2	11,2	26,8	23,7	36,4	37,1	47,5	46,1
C/V-forhold		0,63	0,63	1,00	1,00	1,49	1,49	2,00	2,00	2,50	2,51
C/V + L-forhold		0,55	0,46	0,79	0,71	1,35	1,22	1,64	1,78	2,21	2,15

Tabel 2. Beregnede og målte data for betonblandingerne.

Middeltemperatur T C	Tidsrum h	Hastighedsfaktor ved T C	Modenhed, h ved 20 C
+ 5,0	2	0,3	0,6
- 7,5	5	0	0
- 15,0	8	0	0
- 7,5	3	0	0
+ 5,0	4	0,3	1,2
+ 10,0	2	0,5	1,0
			I alt 2,8
			<u>~ 0,117 døgn</u>

Tabel 3. Modenhed pr. døgn ved klimalagring.

Termin døgn	Metode 1		Metode 2	
	Vandlagring	Klimalagring	Vandlagring	Klimalagring
1	1,0 (1-2)		1,0 (1-2)	
2	2,0 (3-4)		2,0 (3-4)	1,12 (11-12)
7	7,0 (5-6)		7,0 (5-6)	1,70 (13-14)
28	28,0 (7-8)		28,0 (7-8)	4,16 (15-16)
56		31,28 (9,10,11,12)	31,28 (9-10)	7,44 (17-18)
91		35,38 (13-14)	35,38 (9-10)	11,49 (19-20)

Tabel 4. Modenhed i antal døgn ved 20 C. Tallene i parentes er cylindernumrene.

Fysiske egenskaber

Ved de anførte terminer er der som nævnt foretaget måling af emnernes vægt og dimensioner samt af lydhastighed, resonansfrekvens og trykstyrke. Ved hjælp af formlerne i afsnittet »Beregninger« er det dynamiske Poisson forhold og elasticitetsmodul beregnet. Alle disse tal er ikke medtaget i denne rapport, men de er anvendt ved udarbejdelsen af figur 3 - 6 gældende for cylindre. I afhængighed af blandingsnummer og modenhed er rumvægten, lydhastigheden, trykstyrken og elasticitetsmodulet optegnet. De tilsvarende tal for bjælkerne er ikke optegnet, men resultaterne viser samme tendens som for cylindrene.

Rumvægt

Figur 3 viser klart tendensen i rumvægtens variation med blandings sammensætning og lagringsmåde. For de lettere betoner gælder, at overgang til klimalagring bevirker et fald i rumvægt, som for de tungere betoner vendes til en stigning.

Lydhastighed

Figur 4 viser lydhastighedens variation. Det ses, at faldet i lydhastighed ved overgang fra vandlagring til klimalagring bliver mindre, jo større lydhastigheden er. Ved ren klimalagring opnås næsten i alle tilfælde en lavere lydhastighed til samme tidspunkt, end man opnår ved vandlagring.

Trykstyrke

Figur 5 viser et ret jævnt forløb for samme blandingsstype, dog er de opnåede 28 døgns styrker større end de forventede især for blandingerne D og E. Det ses endvidere, at overgang fra vandlagring til klimalagring bevirker en styrkeøgning i alle tilfælde.

Elasticitetsmodul

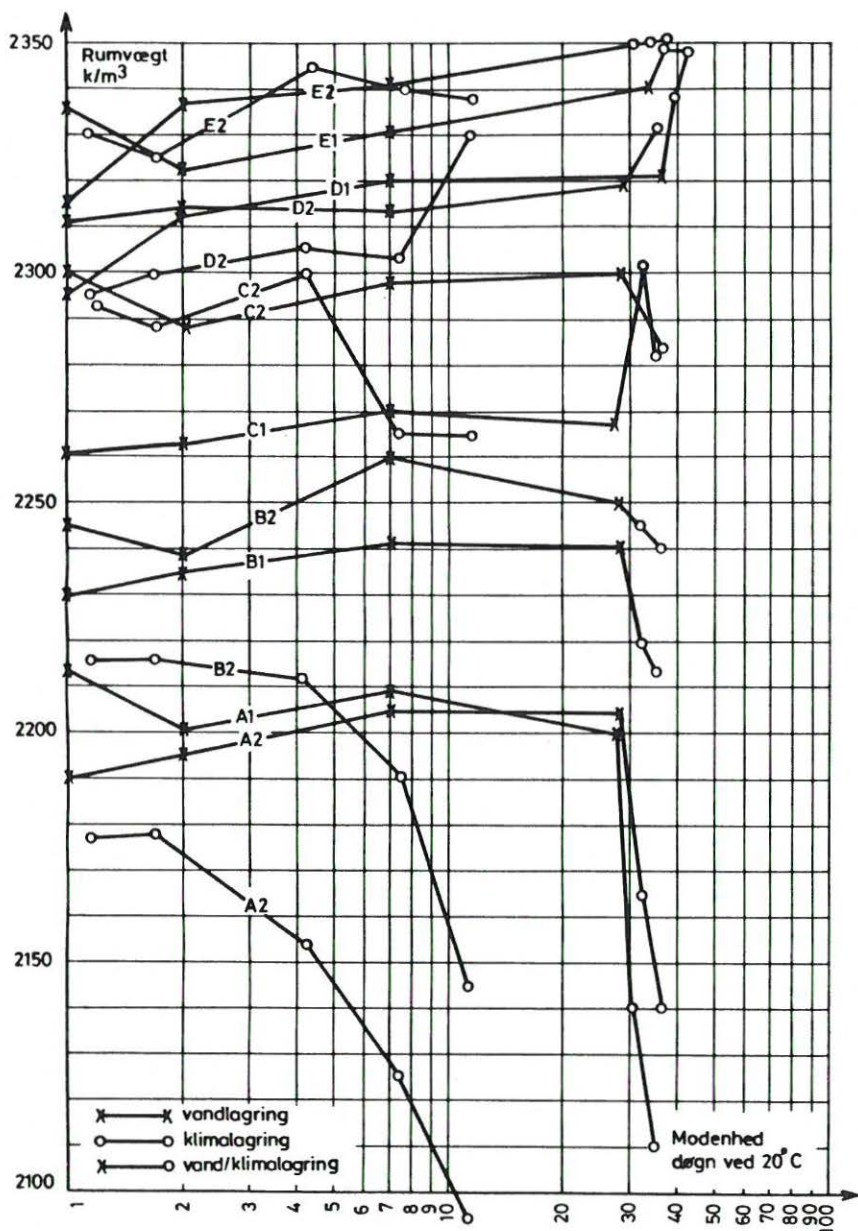
Som nævnt er elasticitetsmodulet beregnet ud fra lydhastighed og resonansfrekvens, idet Poissons forhold bestemmes som den anden ubekendte i de to udtryk. Figur 6 viser, at elasticitetsmodulet vokser med modenheden ved vandlagring, men ved overgang til klimalagring falder modulet, som et udtryk for at betonen er blevet frostangrebet. Det samme billede tegner sig ved den rene klimalagring. Selv for de slappe betoner opnås først en stivhedsforøgelse og derefter et fald. Tabel 4 vedrørende modenhed og faktisk lagringstid bør erindres, når man ser på kurveforløbet.

Poissons forhold

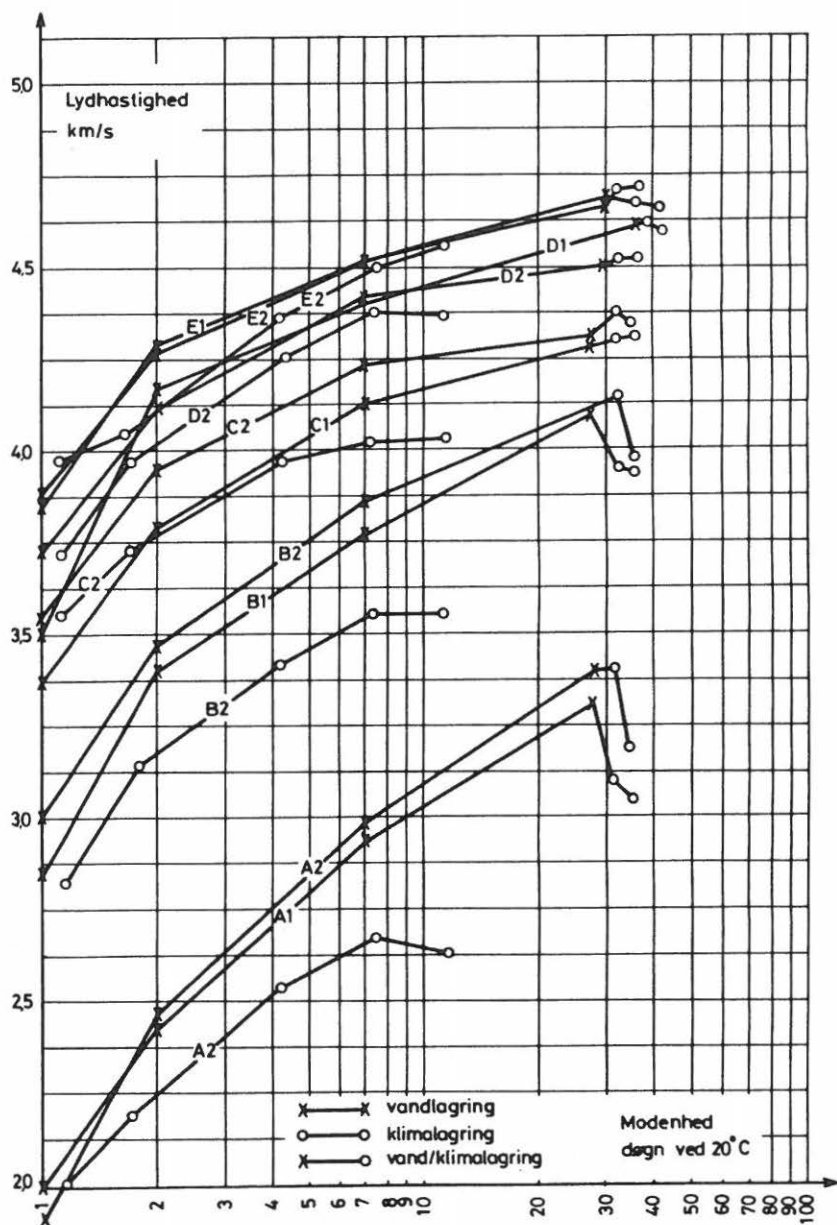
Tendensen for det beregnede Poisson forhold er, at værdierne er aftagende for stigende modenhed, dvs. fra 0,35 - 0,40 ved 1 døgn til 0,25 - 0,30 ved 28 døgn. Ved overgang til klimalagring stiger forholdet igen typisk til 0,33 - 0,38.

Bjælker

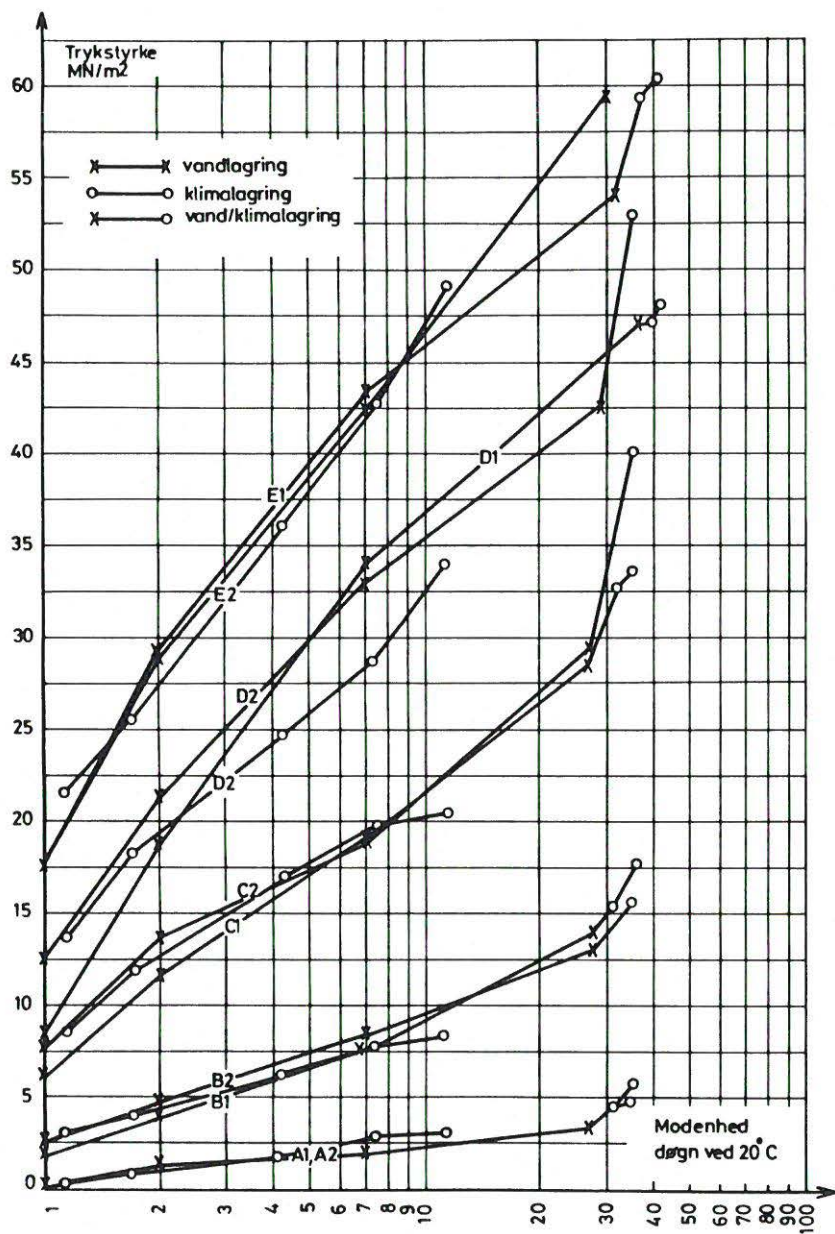
Med god tilnærmelse kan det vises, at variationerne som anført for cylindre kan genfindes ved afprøvningen af bjælkerne, idet de faktiske værdier for elasticitetsmodulet ved bøjningssving-



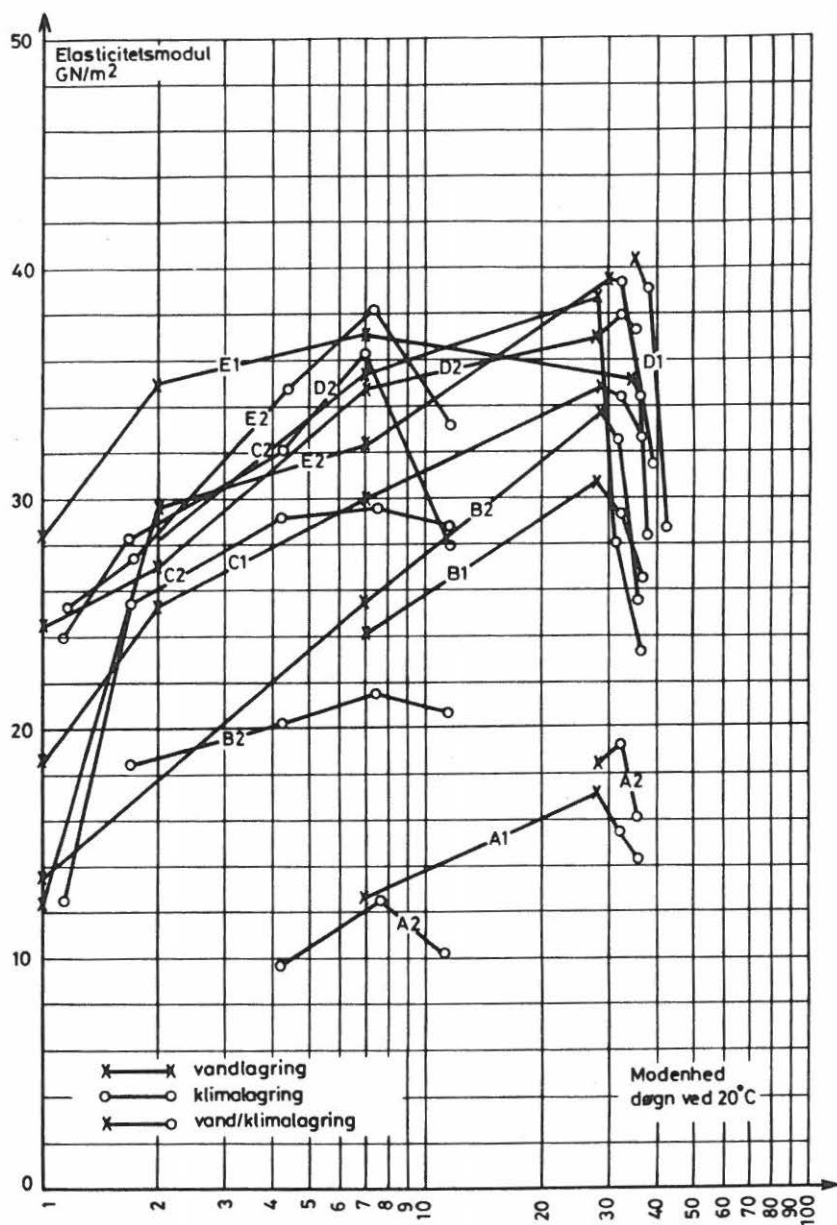
Figur 3. Cylindres rumvægt.



Figur 4. Cylindres lydhastighed.



Figur 5. Cylindres trykstyrke.



Figur 6. Cylindres dynamiske elasticitetsmodul.

ninger er større (5-10%) end målt ved længdesvingninger. Den store bjælke giver det bedste resultat. Dog er der ved den praktiske prøvning af bjælkerne generelt nogle usikkerheder, som er blevet korrigeret.

Statistisk behandling

De opnåede styrkeresultater er statistisk behandlede med henblik på at verificere, om resultaterne tilfredsstiller Neppers formel. Som bekendt lyder formlen

$$\ln E(f_c) = A_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} + A_2 \cdot \frac{V}{C} + A_3 \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot \frac{V}{C} + A_4$$

hvor $E(f_c)$ = middeltrykstyrken, $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$
 t = prøvningstiden, døgn ved konstant temperatur
 $\frac{V}{C}$ = betonens vandcementforhold
 A 'erne = konstanter.

Ifølge [4] kan disse konstanter sættes til følgende værdier

Cementtype	A_1	A_2	A_3	A_4
PFC	- 0,7	- 1,8	- 1,4	+ 4,8
PC	- 0,5	- 1,8	- 1,0	+ 4,8

For luftindblandet beton vides det ikke, om formelen er gyldig, hvis $\frac{V}{C}$ erstattes med $\frac{V+L}{C}$, hvor L er luftindholdet, men i det følgende antages dette at være tilfældet.

Til grund for behandlingen haves 85 sæt data inden for variabelområderne vist i tabel 7. m betegner betonens modenhed som defineret tidligere.

$\frac{1}{\sqrt{m}}$	0,168 - 1,000
$\frac{V}{C}$	0,400 - 1,587
$\frac{V+L}{C}$	0,465 - 2,174
$\ln E(f_c)$	- 2,303 - 4,143
$E(f_c)$	0,1 - 63 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$

Tabel 7. Variabelområder.

På instituttets regnemaskine HP 9845 B er der foretaget en regressionsanalyse efter Neppers model, og tabel 8 viser de fundne resultater angivet som middelværdi $\pm$ bidraget til 95% konfidensintervalgrænserne samt korrelationskoefficienten.

Konstanter	Neppers formel med	
	$\frac{V}{C}$	eller $\frac{V+L}{C}$
A_1	$-0,54 \pm 0,32$	$-0,78 \pm 0,42$
A_2	$-1,77 \pm 0,19$	$-1,30 \pm 0,19$
A_3	$-2,00 \pm 0,34$	$-1,33 \pm 0,35$
A_4	$+4,96 \pm 0,19$	$+4,84 \pm 0,23$
Korrelationskoefficient %	98,8	93,6

Tabel 8. Beregnede værdier for A-konstanterne.

Der er altså ikke noget, der tyder på, at modellen ikke kan bruges. De her anførte observationer kan - sammen med andre tilsvarende - udgøre et bedre grundlag for afprøvning af, om en udvidet Neppers formel er gyldig.

Grafisk behandling

Med henblik på at lette anskueligheden foretages der en grafisk behandling af Neppers form-
ler. Generelt gælder det, at en formel af typen

$$y = A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + A_3 \cdot x_1 \cdot x_2 + A_4$$

i et rumligt koordinatsystem afbildes som en keglesnitsflade.

I det foreliggende tilfælde indføres et nyt koordinatsystem (x'_1 , x'_2 , y), som for det første medfører, at de lineære led forsvinder (parallel forskydning) og for det andet, at produktledet forsvinder (vinkeldrejning).

De nødvendige beregninger viser, at

$$x'_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (x_2 + x_1 + \frac{A_1 + A_2}{A_3})$$

og

$$x'_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (x_2 - x_1 + \frac{A_1 - A_2}{A_3})$$

Den endelige ligning bliver da

$$(x'_1)^2 - (y'_1)^2 = \frac{2 A_1 \cdot A_2}{A_3^2} + \frac{2 \cdot (y - A_4)}{A_3} = k^2$$

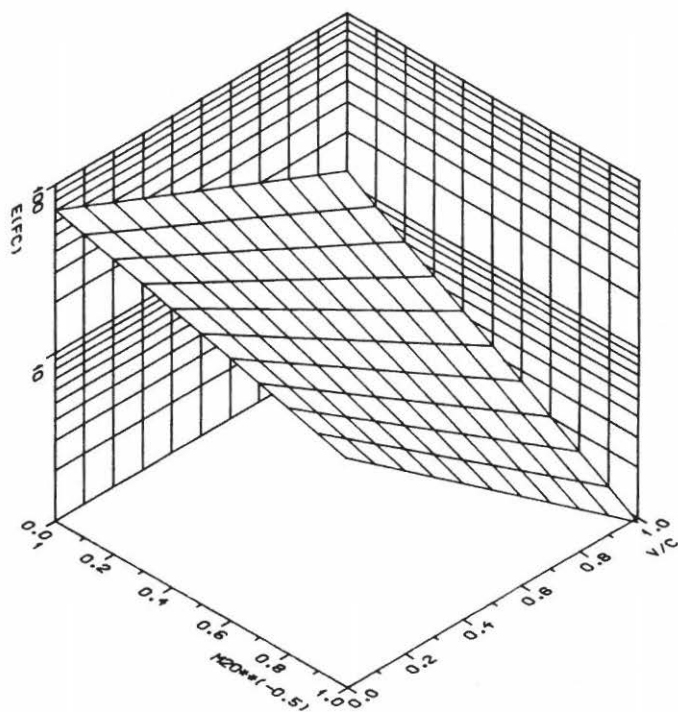
Denne ligning vil i et x'_1, x'_2 -system for en konstant værdi af y afbilde en hyperbel med halv-akserne $\pm k$. Det medfører, at den rumlige figur i x'_1, x'_2 -systemet bliver en keglesnitsflade i form af en sadelflade med hyperbler som grænser. Figuren ligger forskudt for $(x_1, x_2) = 0,0$, og vinkeldrejningen er i dette tilfælde $= 45^\circ$.

Selve udførelsen af den grafiske afbildning sker ved hjælp af programmet PLOT3D, som er udviklet på AUD. Det er et program, som gør det ret simpelt at præsentere data i form af flader og niveaukurver. Selve programmet er beskrevet i [5], og ideen er, at man vælger to uafhængige variable x_1 og x_2 og afbilder den afhængige variabel y i et rumligt koordinatsystem. Programmet kan køre direkte med data indsat eller ved, at man har sideprogrammer, som genererer data til en resultatfil, som anvendes som inddata til PLOT3D.

Det skal bemærkes, at der er en begrænsning vedrørende denne datagenerering, idet programmet PLOT3D fordrer, at punkterne x_1, x_2 varierer ækvidistant i planen, således at y -værdierne ligger i et kvadratisk net. Det kan være uhensigtsmæssigt, men i det foreliggende tilfælde er problemet af mindre betydning, bl.a. fordi der i selve PLOT3D programmet er indlagt procedurer, som gør det muligt at udtegne delområder.

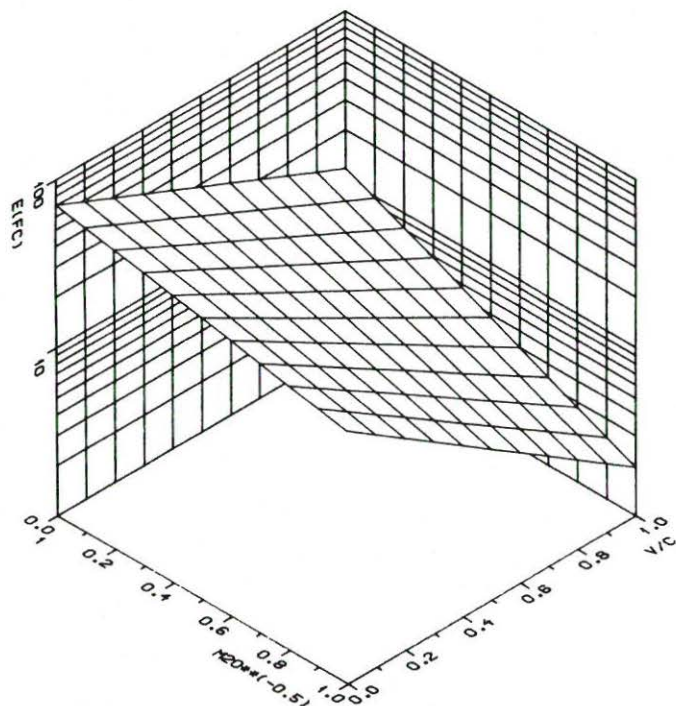
Figur 7 til 14 er resultatet af sådanne grafiske afbildninger. Figur 7 og 8 viser resultatet af afbildningen af den teoretiske formel for PFC og PC. De beregnede formler med henholdsvis V/C og $V + L/C$ som den ene variable er gengivet i figur 9 (V/C) og figur 12 ($V + L/C$). Figur 10 og 13 viser udsnit af den oprindelige flade, og figur 11 og 14 viser niveaukurver svarende til de på figurerne anførte styrkeværdier. Til disse forsøg er der anvendt lavalkalisulfatbestandig cement, som i styrkemæssig henseende skal sammenlignes med rapidcement.

NEPPERS FORMEL FOR PFC



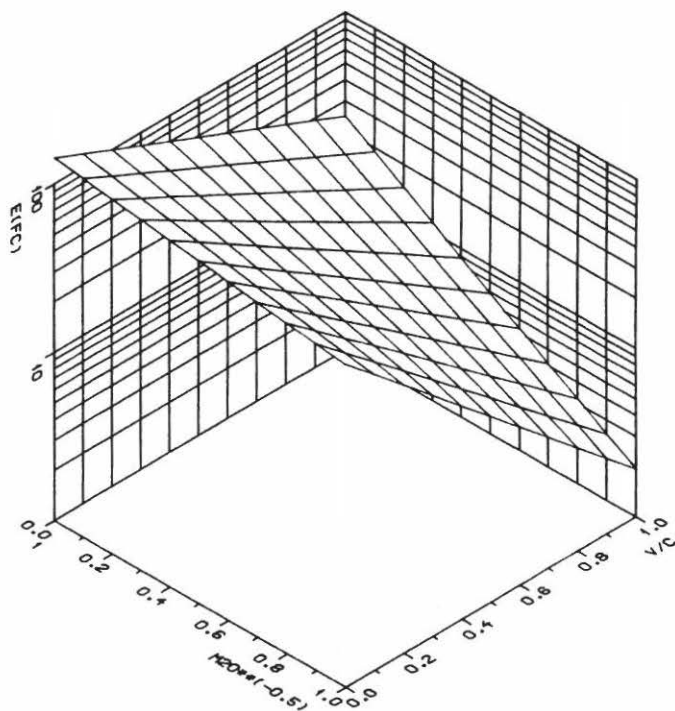
FIGUR 7: TEORI

NEPPERS FORMEL FOR PC



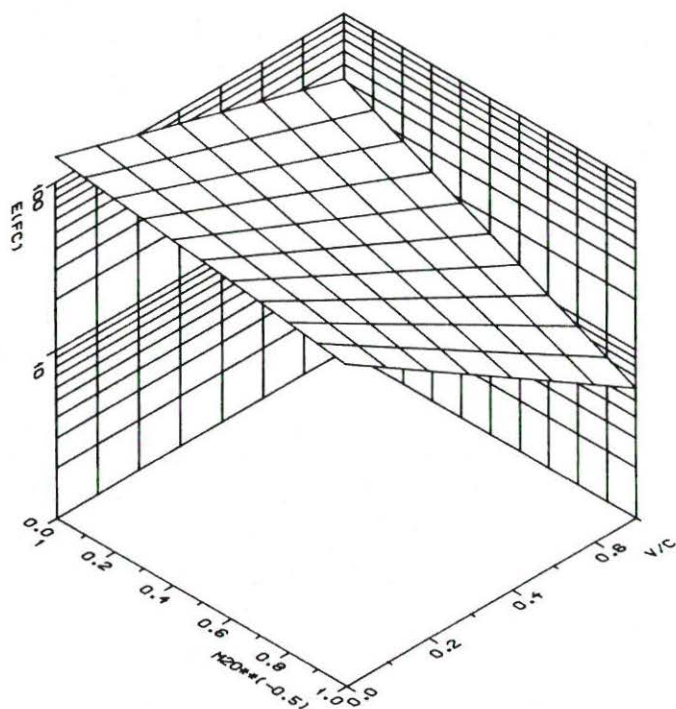
FIGUR 8: TEORI

NEPPERS FORMEL



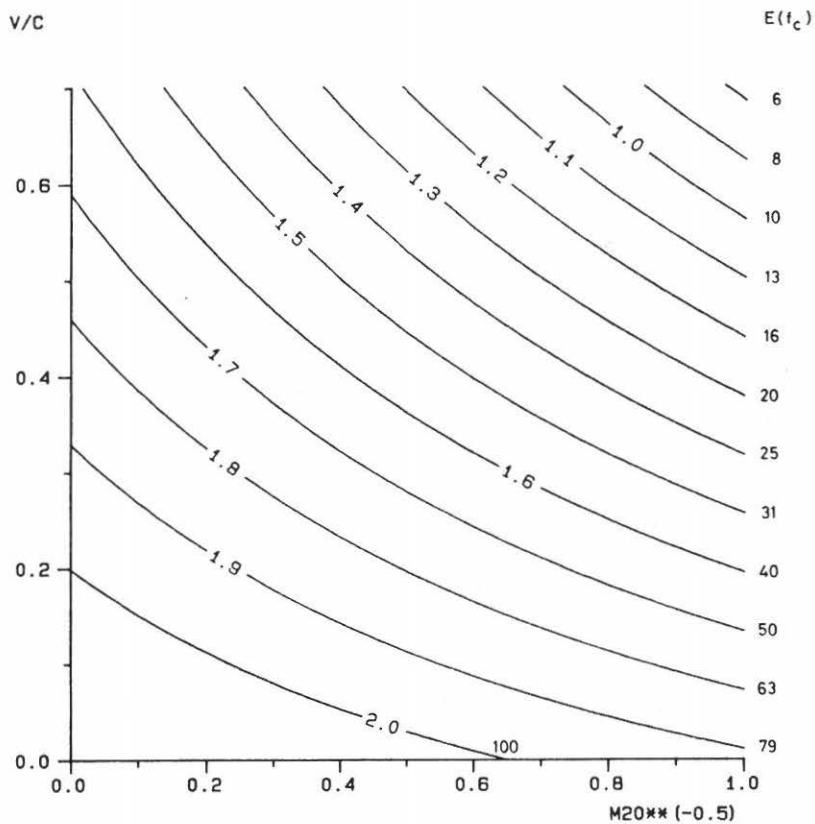
FIGUR 9: FORSØG

NEPPERS FORMEL



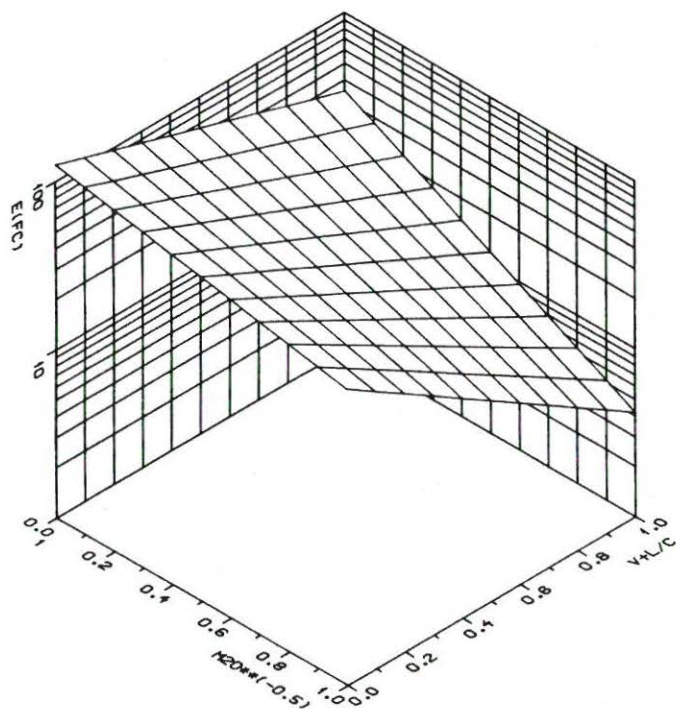
FIGUR 10, FORSØG

NEPPERS FORMEL



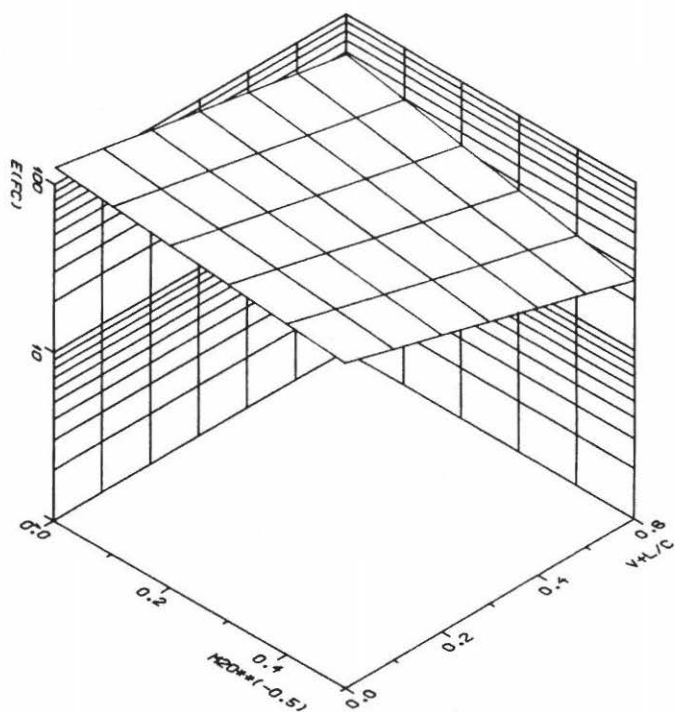
FIGUR 11, FORSØG

NEPPERS FORMEL



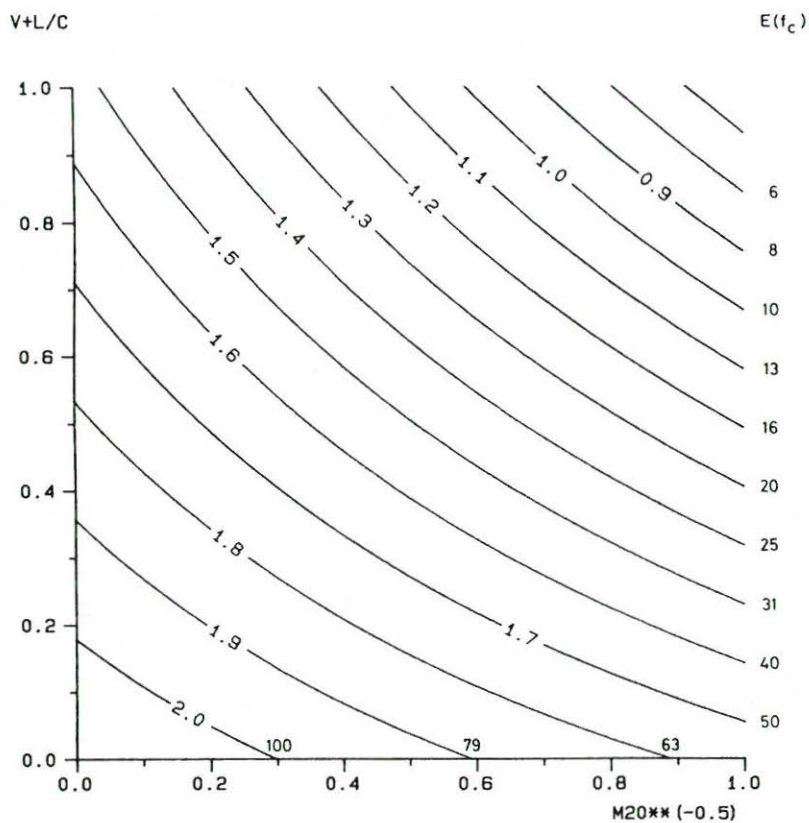
FIGUR 12, FORSØG

NEPPERS FORMEL



FIGUR 13, FORSØG

NEPPERS FORMEL



FIGUR 14, FORSØG

KONKLUSION

Ved laboratoriet for bygningsmateriallære er der udført nogle indledende forsøg, som har til formål at registrere sammenhængen mellem en række betonteknologiske egenskaber og den klimatiske påvirkning, som betonen er blevet udsat for. Det drejer sig specielt om variationen i det dynamiske elasticitetsmodul bestemt ud fra resonansfrekvensen.

Betonblandinger spændende over et stort styrkeinterval er blevet udstøbt i cylindre og bjælker, som enten vandlagres normalt eller udsættes for en kombineret lagring, hvori indgår ren frostpåvirkning.

Resultaterne viser, at de svage betoner taber meget i rumvægt, mens de stærke er mere upåvirkede. Faldet i lydhastighed er også stort ved de svage betoner. Trykstyrken stiger lidt ved overgang til klimalagring ved de sene terminer. Det forekommer måske lidt mærkeligt. På den anden side er forløbet inden for samme blanding fornuftigt. Det ses tydeligt, at det dynamiske elasticitetsmodul falder ved klimapåvirkningen, og det gælder også de stærke betoner. Det er dog uklart, om beregningsforudsætningerne er gyldige.

Udover de anførte resultater skal det nævnes, at der findes en række data, som ikke er medtaget her. Som et indledende forsøg må det betragtes som vellykket, til trods for at der under selve forsøgsudførelsen har været mange småproblemer. Det er f.eks. vanskeligt at opnå de rette resonansomstændigheder.

Under udarbejdelsen af rapporten har forfatteren anvendt nogle af resultaterne til indlæring af EDB i forbindelse med grafikprogrammer.

Metoden vil senere blive forbedret og anvendt til holdbarhedsundersøgelse af betoner, som indeholder indblandet luft og puzzolaner (flyveaske og mikrosilica).

LITTERATUR

- [1] Jensen, Jens Kr. Jehrbo: Ikke-destruktiv prøvning af beton.
Instituttet for Bygningsteknik, september 1978.
Rapport nr. 7806.
- [2] Jensen, Jens Kr. Jehrbo: Resonansfrekvensmålinger på beton.
Instituttet for Bygningsteknik, februar 1985.
ISSN 0105-7421 R 8502.
- [3] Jensen, Jens Kr. Jehrbo: Betjeningsvejledning til klimaskab.
Instituttet for Bygningsteknik, marts 1985.
ISSN 0105-8185 U 8507.
- [4] Betonbogen.
Aalborg Portland, 2. udgave, 1985.
ISBN 87-980916-0-8.
- [5] PLOT3D.
AUD publikation nr. 50, oktober 1984.

